

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический  
 Направление подготовки Энергетическое машиностроение  
 Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Анализ применимости численных алгоритмов для моделирования процессов в топке котла с циркулирующим кипящим слоем</b>

УДК 621.1.016.4-047.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM5A	Кокшарев Олег Максимович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ	Гиль Андрей Владимирович	к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры МЕН	Грахова Елена Александровна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
к.т.н., доцент каф. ЭБЖ	Бородин Юрий Викторович	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Парогенераторостроения и парогенераторных ус- тановок	Заворин Александр Сергеевич	д.т.н., зав. каф. ПГС и ПГУ		

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения по ООП 13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
P1	Способность и готовность самостоятельно учиться и развивать свой общекультурный и интеллектуальный уровень, изменять свой научный и научно-производственный профиль в течение всего периода профессиональной деятельности с учетом изменения социокультурных и социальных условий, вести педагогическую работу в области профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-11), Критерий 5 АИ-ОР (п. 2.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Способность проявлять и использовать на практике навыки и умения организации работ по решению инновационных инженерных задач в качестве члена или руководителя группы, нести ответственность, в том числе в ситуациях риска, за работу коллектива с применением правовых и этических норм при оценке и самооценке профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов, проблемных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-2; ОПК-1; ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.3., п. 2.4., п. 2.5.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Способность и готовность приобретать и применять новые знания и умения с использованием методологических основ научного познания и библиографической работы с привлечением современных технологий, понимать роль информации в развитии науки, анализировать её естественнонаучную сущность, синтезировать и творчески применять при решении инновационных профессиональных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
		ных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Способность осуществлять коммуникации в профессиональной сфере и в обществе в целом, принимать нестандартные решения с использованием новых идей, разрабатывать, оформлять, представлять и докладывать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке	Требования ФГОС ВО (ОК-2,3;ОПК-2,3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Профессиональные компетенции		
P6	Способность и готовность выполнять инженерные проекты с использованием современных технологий проектирования для разработки конкурентно способных энергетических установок с использованием знаний теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах и аппаратах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (п. 1.3.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и вырабатывать компромиссные решения с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний в условиях неопределенности, использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, формулировать выводы в условиях неоднозначности с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию	
Р9	Способность и готовность оценивать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, с применением современного оборудования и приборов, анализировать и разрабатывать рекомендации по их надежной и безопасной эксплуатации, понимать проблемы научно-технического развития сырьевой базы, современных технологий по утилизации отходов в энергетическом машиностроении и теплоэнергетике и научно-техническую политику в этой области	Требования ФГОС ВО (ОПК-1; ПК-7,8,9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, п. 2.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический

Направление подготовки (специальность) Энергетическое машиностроение

Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)      \_\_\_\_\_  
 (Дата)      А.С. Заворин  
 (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5BM5A	Кокшарев Олег Максимович

Тема работы:

Анализ применимости численных алгоритмов для моделирования процессов в топке котла с циркулирующим кипящим слоем

Утверждена приказом директора (дата, номер)	592/с от 07.02.2017
---	---------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1 июня 2017 года
--	------------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Котел с циркулирующим кипящим слоем.</li> <li>2. <math>N_{\text{котла}} = 406 \text{ МВт.}</math></li> <li>3. <math>P_{\text{пп}} = 13 \text{ МПа.}</math></li> <li>4. <math>t_{\text{п.в.}} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C.}</math></li> <li>5. Топливо – антрацит.</li> <li>6. Обеспечить захват серы с помощью <math>\text{CaCO}_3</math>.</li> <li>7. Доля первичного воздуха 78% от всего расхода воздуха.</li> <li>8. Высота насыпного слоя:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>– в пневмозатворе 2,5 м;</li> <li>– в топочной камере 2,5 м.</li> </ul> </li> <li>9. Применить ступенчатую подачу вторичного воздуха.</li> </ol>
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Введение; 2. Литературный обзор; 3. Расчета котла с циркулирующим кипящим слоем; 4. Исследование и анализ способов моделирования процессов гидрогазодинамики котлов с ЦКС в программном комплексе ANSYS Fluent; 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 6. Социальная ответственность; 7. Заключение.
<b>Перечень графического материала</b>	1. Электронная презентация.

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Грахова Елена Александровна
Социальная ответственность	Бородин Юрий Викторович

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

4. Исследование и анализ способов моделирования процессов гидрогазодинамики котлов с ЦКС в программном комплексе ANSYS Fluent;

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	07.02.2017
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ	Гиль Андрей Владимирович	к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ		07.02.2017

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM5A	Кокшарев Олег Максимович		07.02.2017

## Реферат

Магистерская диссертация состоит из 119 страниц, на которых размещены 40 рисунков, 13 таблиц, 2 приложения. В список литературы входит 40 источников.

Ключевые слова: математическое моделирование, ANSYS, Fluent, метод Эйлера-Эйлера, метод Эйлера-Лагранжа, ТЭЦ, ТЭС, котел, теплообмен, горение, топливо, уголь.

Объектом исследования является котел с циркулирующим кипящим слоем, мощностью 406 МВт.

Метод исследования – численное моделирование в пакете прикладных программ ANSYS Fluent.

Предмет исследования – методы численного моделирования котла с циркулирующим кипящим слоем.

Целью данного исследования является анализ применения различных численных алгоритмов для моделирования процессов в котле с ЦКС.

Задачи:

- расчет топочной камеры, циклона, пневмозатвора;
- анализ численных подходов при моделировании котлов с ЦКС;
- проведение математического моделирования котла с ЦКС;
- анализ полученных данных в ходе исследования.

Принятые сокращения и условные обозначения:

ЦКС – циркулирующий кипящий слой;

ГРЭС – городская районная электростанция;

КПД – коэффициент полезного действия;

ВТИ – Всероссийский теплотехнический институт;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	11
1 Литературный обзор .....	15
1.1 Технология сжигания топлива в котлах с ЦКС. Особенности, преимущества, недостатки.....	15
1.2 Методы моделирования процессов в котлах с ЦКС в России.....	18
1.3 Методы моделирования процессов в котлах с ЦКС в зарубежных странах .....	21
2 Расчет котла с циркулирующим кипящим слоем.....	28
2.1 Тепловой расчет топочной камеры .....	28
2.2 Расчет циклона .....	37
2.3 Расчет систем возврата и пневмозатворов.....	42
3 Исследование и анализ способов моделирования процессов гидрогазодинамики котлов с ЦКС в программном комплексе ANSYS Fluent...	45
3.1 Метод Эйлера-Эйлера.....	45
3.2 Метод Эйлера-Лагранжа .....	55
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	67
4.1 Инициализация и оценка инновационного потенциала научного исследования ...	67
4.2 Планирование научного исследования. Расчет трудоемкости работ.....	69
4.3 Формирование бюджета научного исследования .....	70
4.3.1 Основные расходы на оборудование .....	70
4.3.2 Заработная плата.....	71
4.3.3 Дополнительная заработная плата:.....	72
4.3.4 Отчисления на социальные цели .....	72
4.3.5 Расходы на служебные командировки .....	72
4.3.6 Амортизация основных фондов и нематериальных активов (15 % от материальных затрат) .....	73
4.3.7 Расходы на проведение научно-исследовательской работы .....	73
4.4 Определение ресурсной и экономической эффективности исследования .....	73
5 Социальная ответственность .....	78
5.1 Производственная безопасность.....	78
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования. ....	78
5.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследования.....	79
5.1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов. ....	81
5.2 Экологическая безопасность.....	88
5.2.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду .....	88
5.2.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	89

5.3 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя ....	90
Заключение .....	93
Список публикаций.....	95
Список литературы .....	97
Приложение А – Analysis of the numerical algorithms applicability for the processes simulation of the boiler furnace with CFB .....	102
Приложение Б – Календарный план-график НИР (диаграмма Ганта) .....	125

## **Введение**

Как полагают эксперты, будущее теплоэнергетики будет связано с применением топок с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), которые предназначены для сжигания влажного и высокозольного топлива.

Сжигание топлива в ЦКС – это серьезная конкуренция для технологии пылевидного сжигания угля. Данный способ открывает новые возможности для сферы энергетики, решая такие задачи как увеличение эффективности выгорания высокозольного и влажного топлива, уменьшение зольных выбросов, сжигание окислов серы и азота, повышение уровня утилизации минеральной части топлива. Котлы с циркулирующим кипящим слоем лучше подходят для ступенчатого сжигания, которое позволяет снизить выбросы оксидов азота [1].

В настоящее время мировой опыт эксплуатации котлов с ЦКС очень богат. За годы использования ЦКС в энергетике удалось серьезно уменьшить металлоемкость, совершенствовать различные конструктивные решения, повысить уровень надежности и экономичность.

Несмотря на успешный опыт эксплуатации котлов с ЦКС в мировой энергетике, в России представлен только единственный образец (Новочеркасская ГРЭС-9), работающий на данной технологии. Также отсутствуют нормативные методики расчета и малоизучены газодинамические процессы в топочных камерах с ЦКС. Это негативно отражается на развитии отечественного котлостроения и энергетики в целом.

В связи с нехваткой опыта эксплуатации и проектирования котлов с ЦКС, проведение натурных экспериментов невозможно, а проведение исследований на лабораторных установках сопряжено с рядом, за частую не преодолимых, трудностей, связанных с материальными ограничениями на проектирование и монтаж установки, наличия квалифицированного лабораторного персонала, обеспечения пожарной безопасности и т.п.

Поэтому на современном этапе научных исследований вычислительный эксперимент является одним из важных направлений при изучении задач аэродинамики, тепломассообмена и горения. Информация, полученная с помощью численных расчетов, позволяет не только правильно осмыслить и понять физические эффекты, наблюдаемые, например, на экспериментальных установках, но и в некоторых случаях заменить физический или натуральный эксперимент компьютерным как более дешевым и менее трудоемким.

Проведение исследований направленных на совершенствование методов исследования топочных процессов в котлах с ЦКС на основе математического моделирования являются весьма актуальными. Поэтому целью исследования является анализ применения различных численных алгоритмов для моделирования процессов в котле с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС).

В процессе исследования проводилась апробация различных математических подходов на моделях котлов с ЦКС; произведен расчет величины расхода первичного и вторичного воздуха, а также необходимый расход топлива; выполнен расчет геометрических размеров котла с ЦКС и произведён анализ их влияния на аэродинамику частиц и воздуха; выполнена вариация различных начальных условий с целью оценки изменения результатов моделирования.

В результате исследования сделан вывод по возможному применению при моделировании котла с ЦКС каждого из методов – Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа, каждый из которых может быть использован для того или иного случая в зависимости от поставленных задач. Полученные контурные графики и зависимости позволяют оценивать различные параметры прямо, либо косвенно влияющих на работу реального объекта моделирования, а также вносить необходимые правки в конструкцию при необходимости.

В диссертации представлен следующий графический материал:

- контурные графики концентраций частиц и воздуха по сечениям топочной камеры и циклона с цветовой индексацией по объему в долях;

- контурные графики статического давления с цветовой индексацией по давлению в вертикальных, горизонтальных и продольных плоскостях топочной камеры и циклона;
- контурные графики скорости с цветовой индексацией по скорости в вертикальных, горизонтальных и продольных плоскостях топочной камеры и циклона;
- контурные графики температуры с цветовой индексацией по температуре в вертикальных, горизонтальных и продольных плоскостях топочной камеры и циклона;
- контурный график теплового потока с цветовой индексацией по теплоотдаче стен топочной камеры и циклона;
- графики траектории движения частиц;
- графики распределения температуры частиц по высоте и глубине топочной камеры;
- графики распределения статического давления по высоте и глубине топочной камеры;
- произведено сравнение экспериментальных данных с расчетными, полученных в ходе исследования.

Публикации по работе. Основное содержание выполненных исследований изложено в 6 докладах в сборниках конференций (представлены в БД РИНЦ, из которых 2 статьи на английском языке, цитируемые SCOPUS).

Апробация работы. Основные результаты работы, излагаемые в настоящей магистерской диссертации, были представлены на следующих конференциях и форумах:

- IV Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы»;
- IV-ой российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи»;

- VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий»;
- I Международная научно практическая конференция студентов и аспирантов «Современные тенденции котлостроения».

# 1 Литературный обзор

В данном литературном обзоре представлены:

- основные теоретические понятия технологии сжигания с ЦКС;
- современные методы моделирования процессов в котлах с ЦКС в России и зарубежных странах;
- разобраны преимущества и недостатки данных подходов при математическом моделировании котлов с ЦКС.

## 1.1 Технология сжигания топлива в котлах с ЦКС. Особенности, преимущества, недостатки

Основной характерной чертой технологии сжигания твердых топлив в кипящем слое является наличие значительного количества инертного материала в топке. Ниже кратко описаны процессы гидродинамики и сжигания топлив в кипящем слое, а также условия образования и подавления вредных выбросов [1].

При скорости газа, превышающей скорость минимального псевдоожижения (сила лобового сопротивления соответствует силе тяжести) объем слоя увеличивается, образуются пузырьки газа. Этот режим соответствует пузырьковому кипящему слою. При дальнейшем росте скорости газа пузыри сливаются, частицы в надслоевом пространстве объединяются в группы с высокой концентрацией. Этот случай соответствует турбулентному кипящему слою. Если частицы улавливаются и возвращаются в слой, циркулируя по замкнутому контуру, то такой режим работы называется циркулирующим кипящим слоем. В этом случае нет четких границ между турбулентным слоем в нижней части топки и расположенной выше разбавленной фазой. Расход циркулирующего материала в сотни раз превышает расход газа в системе и в ряде случаев зависит от массы слоя при неизменной скорости газа и размерах частиц [2].

Особенностью режима ЦКС помимо собственно организации контура циркуляции является превышение скорости газа над скоростью витания почти всех частиц слоя, т.е. практически все частицы могут быть вынесены из слоя. Однако в переходной зоне турбулентного слоя, а также в надслоевом пространстве вблизи стен существуют значительные возвратные токи, образующиеся за счет неравномерности скорости, соударения частиц, обмена энергией и образования агломератов (пакетов) частиц. Именно этот признак является решающим для отличия режимов ЦКС от других режимов псевдоожижения или движения частиц в потоке газа (например, пневмотранспорта) [2].

Технология ЦКС начала использоваться в сфере энергетики с конца 70-х годов прошлого века. Причиной её внедрения послужило введение более жестких экологических требований.

Главные преимущества ЦКС это:

- большая эффективность ( $>90\%$ ) поглощения оксидов серы посредством подачи известняка в топку. При этом приемлемая температура слоя  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- незначительное число выбросов оксидов азота ( $<200\text{ мг/нм}^3$ ). Их количество зависит от температуры в топке при создании подвода воздуха ступенчатым способом;
- эффективность сжигания топлива различного качества в одном котле (с маленьким выходом летучих, высокосольное, низкокалорийное), которая зависит от стабильности температуры в топке и количества углерода, содержащегося в слое [3];
- упрощенная схема подготовки топлива (дробление).

Также можно выделить такие преимущества котлов с ЦКС как устойчивость к работе в условиях маленьких нагрузок с отсутствием подсветки мазутом, уменьшение котельной ячейки из-за недостатка средств азото- и серочистки, быстрое изменение нагрузки. Отмечается также и более высокий



уровень выгорания топлива (около 99%). Котлы с ЦКС эксплуатируются с меньшим коэффициентом избытка воздуха (1,10–1,15, а не 1,20–1,25) [3].

Несмотря на ряд преимуществ, технология ЦКС имеет и свои недостатки. К ним относятся:

- наличие большого объема футерованных элементов;
- усложненная конструкция котла;
- длительный запуск из «холодного» состояния;
- использование высоконапорных вентиляторов и, как следствие, рост издержек;
- высокий уровень абразивного износа, несгоревшего топлива, уноса золы;
- мощные дутьевые вентиляторы;
- большое сечение топочной камеры [5].

Считалось, что котлы с ЦКС не могут работать на высоких параметрах из-за маленькой температуры в топке. В реальности, произошел ряд технических изменений, к примеру, зольные теплообменники. Производителями котлов с кипящим слоем являются 37 компаний (из них 23 производят котлы ЦКС). В настоящее время за рубежом используются различные модификации технологии ЦКС [2]. Ключевыми датами в развитии технологии ЦКС в мировой энергетике являются:

- 1979 год – первый энергетический котел с ЦКС в Финляндии;
- 1985 год – первый котел с ЦКС с промежуточным перегревом пара;
- 1996 год – первый крупный блок мощностью 225 МВт во Франции с температурой перегрева выше 565 °С;
- 2002 год – ввод блока 300 МВт с котлом ЦКС в США;
- 2009 год – ввод блока 460 МВт (ТЭС «Лагижа», Польша) с суперкритическими параметрами пара, который обеспечивает лучший в мире КПД для блоков с котлами с ЦКС – 43,3% [10];

- 2013 год – ввод блока 600 МВт с котлом ЦКС в Китае. В [6, 7, 8, 9] отмечается, что в Китае работает более 1000 котлов с ЦКС;
- 2016 год – завершен монтаж первого энергоблока с ЦКС мощностью 330 МВт в России.

## **1.2 Методы моделирования процессов в котлах с ЦКС в России**

Сегодня технология ЦКС доказала свою эффективность с технической и экономической точки зрения. В нашей стране существуют нормативные методы теплового [11], гидравлического и аэродинамического расчета котельных агрегатов. До настоящего времени в нормативном методе теплового расчета нет рекомендаций по расчету котлов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. Это связано с отсутствием отечественного опыта эксплуатации энергетических котлов с кипящим слоем. Имеющиеся данные носят разрозненный характер; из широко опубликованных материалов следует отметить [12]. Кроме того, имеется ряд рекомендаций, представленных в отчетах и публикациях НПО ЦКТИ, ВТИ и в диссертационных работах. Среди методик и программ расчета котлов с ЦКС в России также следует отметить разработанную в ОАО «ВТИ» математическую модель топочного контура котла с ЦКС, которая описана в [13, 14].

Большинство специалистов считают, что основой для расчета конвективных поверхностей нагрева котлов с ЦКС может служить нормативный метод [12]. Отличия заключаются в специфических особенностях режимов кипящего слоя, связанных с повышенной концентрацией частиц, что приводит к отличиям в тепловом и материальном балансе топочной камеры. Поэтому расчет гидродинамики и теплообмена в топке с КС и ЦКС является наиболее важным и отличным от аналогичного расчета для традиционного пылеугольного котла. Другими специфическими элементами расчета являются расчет уловителей золы и системы ее возврата в топку, а при наличии зольных теплообменников – расчет их гидродинамики и теплообмена [2]. Однако, существуют новые рекомендации, которые заключаются в назначении

параметров сепараторов, системе возврата и утилизации золы, выборе скоростного режима в топке. К совершенствующимся сторонам развития относится также оптимизация режима работы топок, оптимизация и разработка конструкций топок с ЦКС.

Необходимо отметить, что в 60-х годах в СССР были заложены фундаментальные основы гидродинамики и тепломассообмена псевдооживленного слоя. Широко известны работы С. С. Забродского, О. М. Тодеса, М. Э. Аэрова, Н. И. Гальперина, В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова [15 – 20]. Их результаты использованы в разработке и внедрении аппаратов с кипящим слоем (КС) в химической промышленности и металлургии. Некоторые из них также использовались при реконструкции небольших котлов с КС. Вопросы гидродинамики циркулирующего кипящего слоя в это время не были достаточно изучены в особенности к условиям работы топочных устройств.

В 1989 г. в ВТИ провел систематические экспериментальные и расчетно-аналитические исследования по научному обоснованию использования технологии ЦКС. В этих работах принимали участие Институт проблем энергосбережения АН Украины (г. Киев), КазНИИЭнергетики (г. Алматы), Уральский политехнический институт (г. Екатеринбург), Институт теплофизики СоРАН (г. Новосибирск), Московский энергетический институт и другие организации. За прошедшее время в ВТИ была создана экспериментальная база с двумя крупными аэродинамическими стендами и огневой установкой, пущенной в работу в 1999 году. Наибольшее внимание уделялось изучению вопросов гидродинамики топочного контура (контур циркуляции: топка, сепаратор, система возврата) и тесно связанных с ней вопросов теплообмена, улавливания и возврата частиц, а также смешения вторичного воздуха с сильно запыленным потоком. Эти вопросы являются ключевыми для организации эффективного низкотемпературного сжигания различных топлив и условий образования и подавления вредных выбросов. При этом следует отметить, что процессы гидродинамики, по причине сложного

характера движения двухфазного потока полидисперсных частиц, не описываются простыми математическими зависимостями. Имеющиеся корреляции носят в основном эмпирический характер и зачастую базируются на данных, полученных на небольших установках. Поэтому комплексное исследование указанных вопросов представляется безусловно актуальным [2].

Широко известны научные работы Саломатова В.В., Старченко А.В. В [40] говорится о необходимости в качественном проектировании мощных энергетических парогенераторов с ЦКС, что чрезвычайно актуально прежде всего для российской энергетики. Это в значительной степени зависит от представления и анализа газодинамических процессов, особенно, в топочной камере. Проводится математическое моделирование в пакете прикладных программ FIRE 3D с описанием получившихся визуальных результатов топочных процессов. Отмечается, что наилучшие результаты по топочным процессам в ЦКС, как и характерные признаки ЦКС, достигаются тогда, когда режим сжигания топлива реализуется с более тонким дисперсным составом. В любых других режимах сжигания с участием в полифракционном составе более крупных фракций (дробленка) формируются условия, которые препятствуют устойчивому воспламенению и дальнейшему горению, выносу частиц из слоя и их окончательному выгоранию. Так, в первом варианте проводимого эксперимента доля несгоревшей горючей части в частицах, покидающих топку, в целом не превышала 16 %, а во втором недопустимую по технологии долю – до 76 %

В 2016 году тему научного обоснования сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое представляет в своей докторской диссертации Рябов Г.А. Ранее, в 2014 году, Долгушин И.А. защитил кандидатскую диссертацию, в которой показал, как технологию ЦКС можно использовать для повышения эффективности и улучшения экологических показателей ТЭС.

В России до сих пор не была разработана программа теплового расчета котлов с ЦКС. Использование известных программ расчета традиционных пылеугольных котлов («ТРАКР», «Бойлер-дизайнер»), основанных на

рекомендациях Нормативного метода расчета паровых котлов, может давать ошибочные результаты. Разработка обоснованного метода расчета топочного контура является необходимой для создания котлов с ЦКС [2].

До определенного времени данная технология не применялась на ТЭЦ в России. В 2007 году 6-й Генерирующей компанией оптового рынка электроэнергии (сейчас входит в состав 2-й Генерирующей компании) на Новочеркасской ГРЭС (Ростовская область) был заложен первый камень в фундамент первого в России и второго в мире энергоблока с котлом ЦКС на сверхкритические параметры электрической мощностью 330 МВт. Первоначально, пуск энергоблока в коммерческую эксплуатацию был назначен на конец 2012 года, однако затем не однократно откладывался. В 2013 году продолжалось сооружение энергоблока, а пуск был намечен на 2015 г. По состоянию на окончание февраля 2016 года, на энергоблоке №9 Новочеркасской ГРЭС мощностью 330 МВт завершен монтаж первого в России котла с циркулирующим кипящим слоем на сверхкритические параметры пара. Оборудование спроектировано, изготовлено и поставлено Таганрогским котлостроительным заводом «Красный котельщик», входящим в состав компании «Силовые машины», а также компанией Amec Foster Wheeler (Великобритания). В настоящее время на ГРЭС ведутся пусконаладочные работы [21].

### **1.3 Методы моделирования процессов в котлах с ЦКС в зарубежных странах**

Стоит отметить, что наибольшей эффективностью, с учетом уровня прогресса инновационной вычислительной техники, обладают методы численного анализа. Они имеют ряд преимуществ в сравнении с теоретическими и эмпирическими методами [5]. Необходимо понимать, что программы расчета котлов с ЦКС, разработанные за границей, обычно недоступны по инициативе компаний, занимающихся поставкой и разработкой

котлов. Они находятся в постоянном процессе совершенствования, благодаря непрерывным теоретическим исследованиям и натурным экспериментам.

Тем не менее, на сегодняшний день, моделирование с применением методов вычислительной газодинамики обычно ограничено 2-х мерной геометрией, для которой поток частиц моделируется с использованием стандартного многожидкостного подхода Эйлера-Эйлера, но для большего понимания процессов, происходящих в котлах с ЦКС, необходимо применять трехмерное моделирование [22]. Однако, из-за высокой вычислительной сложности, лишь несколько зарубежных исследований, доступных в открытых источниках, посвящены полному циклу трехмерного моделирования промышленных котлов с ЦКС [23 – 26].

Методы моделирования топков с ЦКС могут быть разделены на практико-ориентированные и теоретические модели. В теоретических моделях, моделирование гидрогазодинамики производится на основе доступных теоретических принципов, таких как мультифизические модели Эйлера-Эйлера с применением кинетической теории потока частиц. В практико-ориентированных моделях, или инженерных моделях, теории упрощаются и корректируются эмпирическими зависимостями для того, чтобы увеличить скорость расчета и аппроксимировать результаты численного моделирования с результатами натурных измерений [27].

Стоит отметить, что правильное прогнозирование тепло-и массообменных процессов в топках с циркулирующим кипящим слоем имеет важное значение для достижения надежных и эффективных конструкций топочных камер и отдельных элементов котла, а также позволяет снизить эксплуатационные затраты на основе оптимальной компоновки горелочных устройств и воздушных сопел. В индивидуальном рассмотрении физические явления, такие как течение газа с частицами, турбулентность, химические реакции и теплопередача, сложно поддаются прогнозам и анализу. Данный анализ становится более сложным, если данные физические процессы взаимосвязаны в крупномасштабных системах, таких как котлы с ЦКС. Рис.

1.3.1 схематично показывает, как разные аспекты моделирования связаны в системах горения циркулирующего кипящего слоя [27].

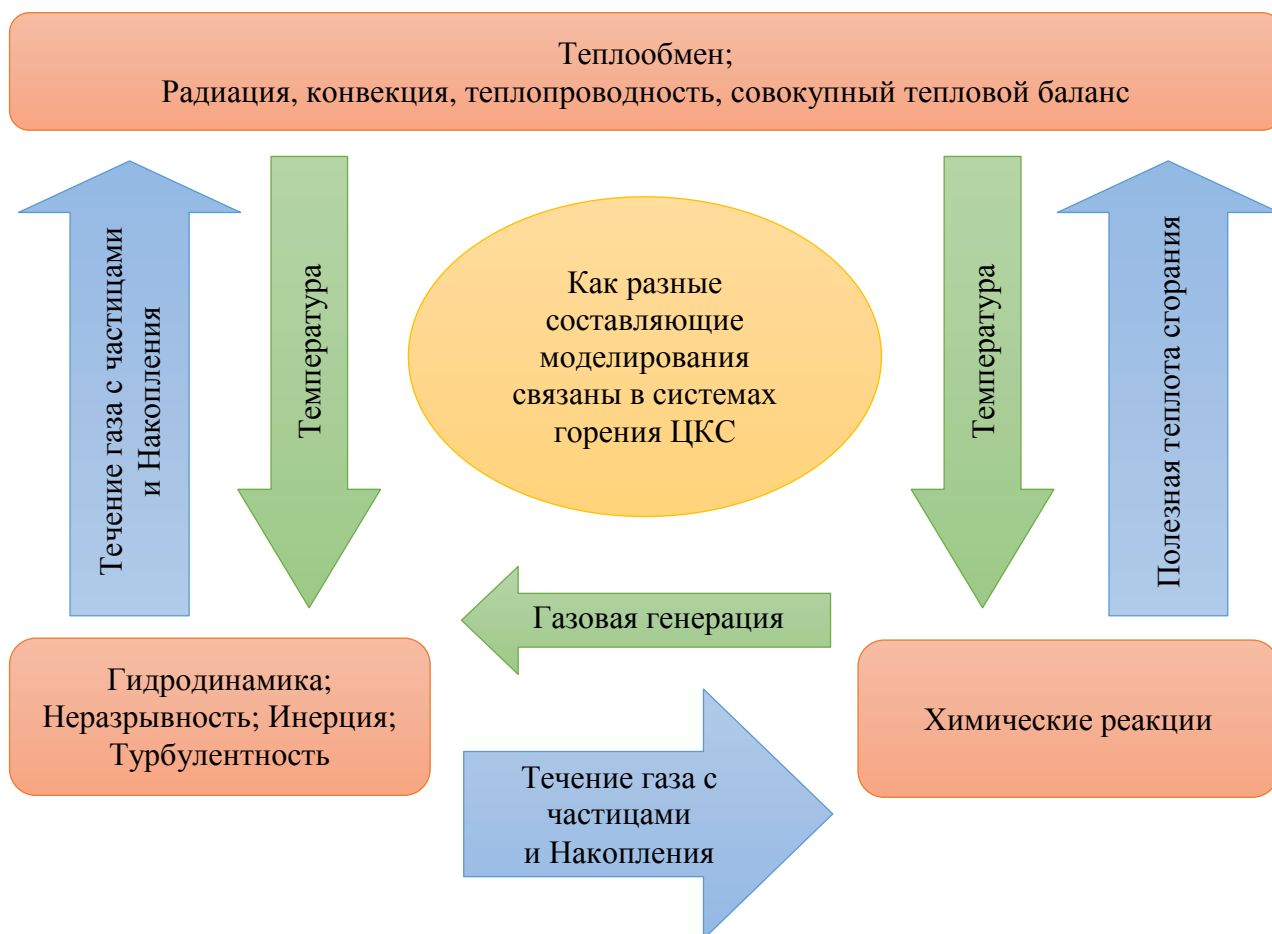


Рисунок 1.3.1 – Связь разных составляющих моделирования в системах горения ЦКС

В [28] упоминается использование многомерных нестационарных уравнений теории взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов при математическом моделировании процессов с ЦКС. Цуо и Гидасповым [28] предложен двумерный подход решения нестационарной гидродинамической модели циркулирующего кипящего слоя. В данной модели используется понятие вязкости дисперсной фазы, которое применяется для учета диссипации энергии между твердыми частицами из-за их произвольных соударений.

На примере котла с ЦКС, установленном на ТЭЦ Лагижа в Польше предлагаются два подхода решения задачи моделирования – Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лангранже (DDPM – Dense Discrete Phase Model), с расширенным методом мультифазной частицы в ячейке (MP-PIC), а также их сравнение [22].

В отличие от использования подхода Эйлера-Эйлера, Эйлеро-Лангражев подход может быть применен для моделирования потока частиц в блоках ЦКС. В Эйлеро-Лангранжеве подходе движение отдельно взятой частицы не рассматривается, напротив, берется во внимание группа частиц. В данном случае каждая ячейка содержит несколько частиц с одинаковыми массами, скоростями, позициями, температурами, составами и т.д., а их количество легко определяется по формуле (1). Взаимодействие между частицами описывается моделями, основанными на кинетической теории потока частиц [27]. Лучистый теплообмен моделировался с помощью метода дискретных ординат. Излучающие свойства  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  были рассчитаны с использованием модели взвешенной суммы серых газов (WSGGM – weighted sum of gray gases model) с использованием различных модельных подходов, в том числе модели, предложенной Бордбаром в [29].

$$n_p = \frac{\dot{m}_{par} \Delta t}{m_p}, \quad (1)$$

где,  $\Delta t$  – шаг по времени при расчете нестационарной системы,  $\dot{m}_{par}$  – массовый расход отдельных участков,  $m_p$  – масса отдельно взятой частицы с учетом диаметра и плотности.

Уравнение движения частицы, которое представлено для одной частицы в ячейке, записывается [22]:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D(\bar{u}_f - \bar{u}_p) + \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} - \frac{\nabla p}{\rho_p} - \frac{\nabla \sigma_s}{\rho_p}, \quad (2)$$

где, индекс  $p$  обозначает частицу,  $f$  – газовую фазу,  $\bar{u}_f, \bar{u}_p$  – представляют векторы скорости газовой фазы и частицы, соответственно,  $\bar{g}$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление газовой фазы,  $\sigma_s$  – гранулированный тензор напряжений, который описывает взаимодействие частиц рассчитанных кинетической теорией гранулированного потока с использованием эйлеровой сетки.



Для расчета тензора напряжений твердой фазы, необходимо предварительно определить несколько параметров. Данные параметры – гранулированное давление, вязкость, вязкость по объемному сжатию, трение, вязкость сдвига и гранулированная температуры.  $F_D(\bar{u}_f - \bar{u}_p)$  определяет ускорение частицы из-за гидродинамического сопротивления.  $-\nabla p / \rho_p$  в уравнении (2) определяет ускорение частиц за счет перепада давления в расположении частиц.

Метод мультифазной частицы в ячейке, или гибридный метод Эйлера-Лагранжа [30], использует Вэнг в [31] для моделирования котла с ЦКС мощностью 250 МВт. Данная модель предполагает моментальное испарение и выход летучих топлива. В состав реакций данной модели входят газификация и горение угля (углерода), реакция конверсии окиси углерода в двуокись углерода, сжигание нелетучих гидрокарбонатов и горение окиси углерода. Также представлены профили температуры, а применяемые модели теплопередачи не описаны.

В своей работе [32] Жанг неоднократно показывает применение метода мультимасштабного минимума потенциальной энергии (EMMS – energy minimization multi-scale) для расчета процесса горения в блоке мощностью 150 МВт. Система реакций была упрощена горением углерода, а тепловой эффект испарения влаги и выхода летучих считался как средний теплоотвод, что повлияло на нижнюю часть топки.

Время вычислений для крупномасштабных топок при помощи теоретических моделей занимает большое количество времени. Таким образом, эмпирические и полуэмпирические модели используются для комплексных расчетов, которые включают в себя моделирование реакции и передачи тепла в дополнение к многофазному потоку.

Опубликованы только несколько полуэмпирических моделей, которые позволяют решать ЦКС в трех измерениях. Одна из таких моделей разработана Хуппаненом и позднее доработана Миоханеном в [26] (далее модель CFB3D). Другие аналогичные комплексные 3D-модели были представлены Вишневым

в [21], Ратсшоу в [22] и Палларес в [23]. В этих моделях, моделирование гидрогазодинамики упрощается, но описание химии горения представлено достаточно детальным образом, вместе с различными неоднородными и однородными реакциями газификации и горения. Решение уравнения энергии, как правило, состоит из понятий, связанных с тепловым эффектом реакции, конвекцией газа и твердых частиц, теплопередачей к стенам, и диффузионное перемешивание в турбулентном потоке [20, 22].

Палларес реализовал простую модель радиационного теплообмена в модели полуэмпирического процесса [33]. Лучистый теплообмен моделировался как серое излучение, в то время как перенос излучения между ячейками ограничивался тремя ортогональными направлениями граней ячейки для каждой шестигранной ячейки расчета. Влиянием излучающих газов пренебрегли. Модель была применена для моделирования промышленного образца котла с ЦКС мощностью 12 МВт, для которого подробных исходных данных не указано. Также сообщается, что в области с низкой концентрацией твердых частиц, таких как верхняя часть топки, количество тепла, выделенное в среду, существенно зависит близлежащих областей [33]. Это доказывает потребность в более сложных излучающих моделях, которые учитывают эффект дальнего действия в данных видах систем.

Во всех выше рассмотренных трехмерных моделях, лучистый теплообмен внутри топки не решается отдельно, однако он был включен в общий тепловой поток между взвешенным веществом и стенами. В топке котла с ЦКС, лучистый теплообмен происходит между частицами, излучающими газами и теплопередающими поверхностями [34]. При полной нагрузке и, особенно, в нижних частях, концентрация твердых частиц в топке высокая, и в данном случае взвесь может считаться оптически толстой средой, что упрощает подсчет лучистого теплообмена. Однако, в условиях низкой нагрузки, концентрация твердых частиц в верхней части топки может быть небольшой: условия могут быть сравнимы с надслоевым пространством (газовой фазы с низкой концентрацией твердых частиц в топке котла с кипящим слоем). Кроме

того, при горении в среде кислорода, доля излучающих газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) значительно выше ( $>90\%$ ), чем в условия горения в воздухе ( $<30\%$ ), что влияет на радиационный теплообмен. Высокая концентрация поглощающего газа в кислородной среде ограничивает использование ранее разработанных моделей со свойствами излучающих газов, которые были в основном разработаны для систем горения в воздухе [29].

В настоящее время существует незначительное число материалов эмпирических исследований и познаний определенных аспектов технологического характера для применения псевдооживленного слоя в целях реализации процессов массо- и теплообмена. Для покрытия различных нужд необходимых для разработки топок с кипящим слоем нужен значительный прогресс в сфере математического и численного моделирования химико-физических процессов в кипящем слое. Однако данные задачи смоделировать не так просто и, как следствие, на пути специалистов стоит масса трудностей [35]. Например, правильное задание начальных параметров, которые в большинстве случаев очень сложно оценить теоретически. Чаще всего корректность модели подтверждается практическими методами численного моделирования, что в свою очередь занимает большое количество временного ресурса.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5BM5A	Кокшарев Олег Максимович

Институт	Энергетический	Кафедра	Парогенераторостроения и парогенераторных установок
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	– примерный бюджет НИ – 90000 рублей; – в реализации НИ задействованы 2 человека: руководитель и магистрант;
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	– амортизация основных фондов и нематериальных активов (15% от материальных затрат);
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– отчисления по страховым взносам 30% от ФОТ

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	– Инициализация и оценка инновационного потенциала научного исследования; – потенциальные потребители результатов НТИ;
2. Разработка устава научно-технического проекта	– Не требуется
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	– перечень работ (этапов), необходимых для достижения поставленных задач по НИ; – матрица ответственности; – определить общую продолжительность работ в рабочих днях; Формирование бюджета НИ, в т.ч.: – основные расходы на оборудование; – расходы на служебные командировки; – основная и дополнительная заработная плата; – расходы на служебные командировки.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	– определение ресурсной и экономической эффективности исследования

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения научного исследования (диаграмма Ганта)
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	4.04.2017
--	-----------

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры МЕН	Грахова Елена Александровна	ассистент		4.04.2017

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM5A	Кокшарев Олег Максимович		4.04.2017

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Темой научного исследования является «Анализ применимости численных алгоритмов для моделирования процессов в топке котла с циркулирующим кипящим слоем».

Объектом исследования является математическая модель котла с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), который предназначен для сжигания различного угля (в т.ч. низкосортного, биомассы со смесью низкосортного топлива и т.д.) для выработки перегретого пара.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является формулировка НИ, представление его инновационного потенциала, подсчет основных расходов, заработных плат, а также перечня и графика работ, необходимых для достижения поставленных задач.

### **4.1 Инициализация и оценка инновационного потенциала научного исследования**

Технология сжигания твердых топлив в ЦКС является наукоемкой. Даже сейчас, когда имеется богатый опыт работы котлов с ЦКС и их единичная мощность превышает 1000 МВт (тепл.), проводятся интенсивные исследования сложных процессов, как в стендовых, так и в промышленных условиях.

В соответствии с положениями Энергетической стратегии России на период до 2030 г. [38], экологически чистая угольная генерация должна развиваться путем внедрения энергоблоков на сверхкритические параметры пара, оборудованные котлами с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС).

Также распоряжениями Правительства РФ от 31 октября 2014 г. №2178-р и от 24 декабря 2014 г. №2674-р утверждены поэтапный график создания 2015-2017 г.г. 46 отраслевых справочников НТД и перечень 33 областей их применения, в том числе справочник НТД «Сжигание топлива на крупных

промышленных предприятиях в целях производства энергии», подготовку которого планируется завершить в 2017 г.

Ввод котла с ЦКС является эффективным средством решения задач, поставленных в Стратегии, касающихся развития угольной генерации. Технология ЦКС имеет большой потенциал для эффективного использования угля различного качества, а также местных топлив с целью диверсификации региональных топливно-энергетических балансов. Так же эта технология отвечает требованиям Стратегии, касающихся экологической безопасности угольных ТЭС. В мире эта технология уже хорошо отработана, в том числе и на сверхкритические параметры пара, а особенности реализации протекающих процессов создают условия для высокоэффективного и экологичного сжигания широкой гаммы топлив и их смесей с возможной последующей глубокой утилизацией тепла уходящих газов котла.

Из вышесказанного видно, что большинству промышленных и энергетических предприятий необходимо переходить на принципы наилучших доступных технологий (НТД), предполагающие контроль и учет вредного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду.

Целевым рынком для разрабатываемого проекта являются предприятия энергетического сегмента (ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС, ГЭС), а также любой другой сегмент промышленности (от нефтехимического до пищевого), которые планируют реализовать данную технологию сжигания непосредственно на своем объекте для обеспечения технологических нужд, а также научные институты и проектные организации, проводящие исследования в данной области.

Благодаря этому для достижения поставленных задач необходимо провести данное НИ, которое является актуальным и инновационным, поскольку позволит в дальнейшем изучать данные котлоагрегаты более детально, используя полученные данные в конструкторских, эксплуатационных работах и исследованиях.

## 4.2 Планирование научного исследования. Расчет трудоемкости работ

В данном разделе представлено планирование работ по научному исследованию. В таблице 4.2.1 приведены состав и длительность работ.

Таблица 4.2.1 – Этапы и содержание НИ

№	Этапы работ	Продолжительность работы			Исполнитель
		$t_{\max}$	$t_{\min}$	$t_{\text{ож}}$	
1	Разработка и утверждение ТЗ	1	1	1	Р
2	Изучение технической документации на объект исследования	5	3	4	М
3	Проведение теоретических расчетов и обоснований	10	7	8	М
4	Выбор конструкции исследуемого объекта	5	2	3	М
5	Выбор математической модели	18	15	16	Р, М
6	Математическое моделирование процессов	45	20	30	М
7	Построение графиков для исследуемых данных	10	7	8	М
8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	3	1	2	Р, М
9	Окончательная обработка результатов и основные выводы, рекомендации	7	5	6	М
10	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	21	14	17	М
11	Согласование актов сдачи выполненного НИ	10	7	8	М
Итого		135	82	103	

Р – руководитель, М – магистрант

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

$$t_{\text{ож}} = \frac{(3 \cdot t_{\text{мин}} + 2 \cdot t_{\text{макс}})}{5},$$

где,  $t_{\text{мин}}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;  $t_{\text{макс}}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн..

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой неопределенностью на основе вероятностных методов.

На основе расчета трудоемкости и продолжительности выполнения всех включенных работ в план, была составлена диаграмма Ганта (Приложение Б).

Подводя итог данного раздела можно заключить, что на разработку данного научного исследования потребуется 103 календарных дня при работе двух человек – руководителя и магистранта.

## **4.3 Формирование бюджета научного исследования**

### **4.3.1 Основные расходы на оборудование**

Определение затрат по запланированным работам осуществляется в форме сметной плановой калькуляции, для расчета которой должны использоваться действующие прейскуранты основных цен. Смета представлена в таблице 4.3.1.1.



Таблица 4.3.1.1 – Основные расходы на оборудование

Статьи затрат	Стоимость, руб.
Персональный компьютер	28000
Дополнительный монитор	12000
Комплекующие ПЭВМ	1000
Принтер	6500
Стол	3000
Стул	1500
Лампа	1500
Необходимое ПО для расчетов	бесплатная образовательная лицензия
Итого	53500

### 4.3.2 Заработная плата

Для расчета заработной платы приняты дневные ставки для руководителя и магистранта в размере 172 и 48 рублей в час соответственно (при восьми- часовом рабочем дне). Расчет зарплаты представлен в таблице 4.3.2.1.

Таблица 4.3.2.1 – Расчет по статье «Основная зарплата»

Этапы работы	Трудоемкость, чел/день		Суммарная основная заработная плата, руб.
	М	Р	
Разработка и утверждение ТЗ	1	1	1760
Изучение технической документации на объект исследования	4		1536
Проведение теоретических расчетов и обоснований	8		3072
Выбор конструкции исследуемого объекта	3	1	2528
Выбор математической модели	16	1	7520
Математическое моделирование процессов	30		11520
Построение графиков для исследуемых данных	8		3072
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	2	2	3520
Окончательная обработка результатов и основ-	6		2304

Этапы работы	Трудоемкость, чел/день		Суммарная основная зарплата, руб.
	М	Р	
ные выводы, рекомендации			
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	17		6528
Согласование актов сдачи выполненного НИ	8	2	5824
Итого:	103	7	49184

#### 4.3.3 Дополнительная заработная плата:

$$Z_{доп} = 0,1 \cdot Z_{ос} = 0,1 \cdot 49184 = 4918,4 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4 Отчисления на социальные цели

Единый социальный налог (ЕСН) учитывает отчисления в фонд пенсионного страхования, фонд социального страхования и фонд обязательного медицинского страхования (27 %):

$$ECH = 0,27 \cdot Z_{общ} = 0,27 \cdot (Z_{всп} + Z_{осн}) = 0,27 \cdot (49184 + 4918,4) = 14607,65 \text{ руб.}$$

#### 4.3.5 Расходы на служебные командировки

Для получения действительных данных по конструкции котла, представлении наработок по проекту и получении обратной связи от экспертов необходима служебная командировка, которая представлена в формате конференции.

Суточные составляют 100 рублей, суммарная продолжительность командировок 2 дня.

$$K_1 = 100 \cdot 2 = 200 \text{ руб.}$$

Проезд до места проведения конференций и обратно составляет:

$$K_2 = 3400 \text{ руб.}$$

#### 4.3.6 Амортизация основных фондов и нематериальных активов (15 % от материальных затрат)

$$A = 0,15 \cdot K_{осн} = 0,15 \cdot 53500 = 8025 \text{ руб.},$$

где,  $K_{осн}$  – суммарная стоимость основных средств (технологическое и вспомогательное оборудование, производственный и хозяйственный инвентарь).

#### 4.3.7 Расходы на проведение научно-исследовательской работы

Смета данных расходов приведена в таблице 4.3.7.1. Рассчитываемая смета расходов включает затраты на приобретение необходимого оборудования, для проведения НИ и текущие расходы.

Таблица 4.3.7.1 – Смета расходов на проведение научного исследования

Статьи расходов	Расходы, руб.
Оборудование	53500
Основная заработная плата	49184
Дополнительная заработная плата	4918,4
Отчисление на социальное страхование	14607,65
Расходы на служебные командировки	3600
Амортизация	8025
Итого	133835,1

Таким образом себестоимость работ данного научного исследования составляет 133835,1 рублей, но т.к. весь комплекс работ проводится на базе кафедры ПГС и ПГУ НИ ТПУ, то расходы на оборудование не учитываются. Итого расходы на проведение научного исследования составляют 80335 рублей.

#### 4.4 Определение ресурсной и экономической эффективности исследования

При сравнительной оценке эффективности исследования рассмотрим интегральный показатель эффективности разработки. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{133835,1}{1000000} = 0,134.$$

где,  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского исследования.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p;$$

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a.$$

где,  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;  $b_i^a$ ,  $b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;  $n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Способ	Весовой коэффициент параметра	Натурный эксперимент	ANSYS Fluent (ПО)
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	3	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	1	3
3. Точность	0,15	2	4
4. Энергосбережение	0,20	1	3
5. Надежность	0,25	5	4
6. Материалоемкость	0,15	1	5
ИТОГО	1	2,35	3,9

Как видно проведенных расчетов самый низкий интегральный показатель ресурсоэффективности при проведение натурного эксперимента.

Интегральный показатель эффективности натурного эксперимента и программного обеспечения ANSYS Fluent определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{3,9}{0,134} = 29,1;$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_{\phi}^a} = \frac{2,35}{0,134} = 17,54.$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{29,1}{17,54} = 1,66.$$

где,  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта.

В результате сравнения интегрального показателя эффективности было выявлено, что программное обеспечение ANSYS Fluent, на котором производилось научное исследование при сравнительной оценке в 1,66 раза эффективнее натурного эксперимента. Отсюда можно сделать вывод об эффективности и целесообразности научного исследования, которое в конечном счете характеризуется как инновационное и ресурсоэффективное.

## Список публикаций

1 Артамонцев А.И., Кокшарев О.М., Конструкционные материалы – как основа ресурсоэффективности в энергетике, материалы III-го Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 2015 г.

2 Артамонцев А.И., Кокшарев О.М., Тенденции развития конструкционных материалов в современном котлостроении, материалы IX-ой Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», 2015 г.

3 Гиль А.В., Кокшарев О.М., Лебедь Д.В., Старченко А.В., Численное моделирование процессов в топке котла при переводе на непроектное топливо, материалы VI-ой Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», 2015 г.

4 Гиль А.В., Кокшарев О.М., Исследование топочных процессов в пылеугольной топке при сжигании различных каменных углей, материалы II-ой Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику», 2016 г.

5 Кокшарев О.М., Эффективность работы котлов с ЦКС большой мощности и трудности в реализации их математического моделирования, материалы IV-ой российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», 2016 г.

6 Кокшарев О.М., Применение численных методов для исследования процессов в топочных камерах котлов с ЦКС, материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», 2016 г.

7 Кокшарев О.М., Численный анализ топочной среды при организации сжигания твердых топлив и их смеси, материалы IV-ого

Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 2016 г.

8 The Boiler Furnace Numerical Modeling of Burning Non-Standard Fuel, Gil, A.V. , Koksharev, O.M., Lebed, D.V., Starchenko, A.V., MATEC Web of Conferences, Volume 72, 9 August 2016, Article number 01031

9 Numerical methods application to study processes in the CFB boilers combustion chambers, Koksharev, O.M., Gil, A.V., MATEC Web of Conferences 92 , 01044 (2017)

10 Анализ применения численных алгоритмов для решения задач моделирования топочной среды в котлах с циркулирующим кипящим слоем материалы I-ой Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Современные тенденции котлостроения», 2017